

AQUECIMENTO AMBIENTE COM AQUECEDORES ELÉCTRICOS COM E SEM ACUMULAÇÃO DE CALOR.

Celestino Ruivo, António Mortal
Área Dep. Eng. Mecânica.
EST/UAlg

1. RESUMO

A manutenção das condições de conforto térmico no interior de muitos dos edifícios residenciais e de serviços durante os meses mais frios é conseguida com recurso a sistemas de aquecimento mais ou menos sofisticados que utilizam quantidades assinaláveis de energia.

Para além das condições de conforto térmico é também importante assegurar a manutenção da qualidade do ar. Esta é conseguida em muitos casos com a utilização duma quantidade mínima de ar novo que terá também de ser aquecida.

Actualmente, a utilização de simples sistemas de aquecimento com resistências eléctricas e sem acumulação de calor tais como aquecedores a óleo, termo-ventiladores portáteis é bastante generalizada nos espaços residenciais devido principalmente ao relativo baixo custo e simplicidade de instalação e de funcionamento.

Os sistemas de aquecimento com resistências eléctricas e com blocos de armazenamento de calor sensível são uma das soluções alternativas. Contudo, são relativamente mais caros e a sua instalação já requer mais cuidados. Este tipo de solução é normalmente encarada por parte do cliente quando se demonstra ser vantajoso tirar partido do sistema tarifário da energia eléctrica de modo a obter uma redução nos custos de energia eléctrica. Todavia, o investimento inicial e os encargos com a potência contratada podem tornar esta tecnologia inviável do ponto de vista puramente económico.

Com esta tecnologia, há vantagens evidentes para o sector electro-produtor devido à deslocação dos consumos de energia para o período de horas de vazio.

Este trabalho mostra a importância da realização das análises económica e energética para escolher entre os sistemas de aquecimento eléctrico, com e sem acumulação, qual o mais atractivo na óptica do cliente comum. Para tal, são calculadas as cargas térmicas de aquecimento, num base horária para toda a estação de aquecimento, e são analisados os dois tipos de solução, com e sem elementos de acumulação de calor, para depois se poder fazer a análise económica.

1-INTRODUÇÃO

A sensação térmica do ser humano depende da temperatura, velocidade e da humidade relativa do ar e da temperatura radiante das superfícies que o rodeiam. A maioria dos sistemas de aquecimento apenas controlam directamente a temperatura.

Hoje em dia existe uma grande variedade de sistemas de aquecimento eléctrico tirando partido do efeito de Joule sendo o calor transmitido por convecção ou por radiação. Alguns destes sistemas dispõem adicionalmente dum meio sólido para acumulação de calor.

Nas figuras 1 e 2 mostram-se respectivamente fotos de sistemas de aquecimento eléctrico sem e com acumulação.



Fig. 1 – Sistema de aquecimento eléctrico sem acumulação

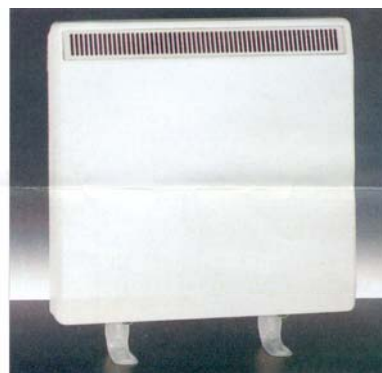


Fig. 2 – Sistema de aquecimento eléctrico com acumulação

Os dispositivos de controlo de temperatura de alguns destes sistemas não são suficientemente precisos porque não controlam directamente a temperatura dos espaços na zona ocupada ou simplesmente não dispõem de qualquer sistema de controlo. Estes sistemas apresentam normalmente um custo relativamente baixo, mas do ponto de vista da garantia das condições de conforto e do consumo de energia aparentam evidenciar alguns aspectos negativos.

Os sistemas que dispõem de um sistema de controlo de temperatura mais eficiente são relativamente mais caros, mas o seu desempenho muito melhor.

Antes de se escolher os sistemas de aquecimento dever-se-á apostar na melhoria da qualidade térmica da envolvente por forma a tirar partido dos ganhos solares, da inércia térmica dos espaços e da colocação dum nível de isolamento térmico adequado.

A decisão acertada pela escolha dum sistema com acumulação ou sem acumulação, dispondo de controlo de temperatura mais ou menos eficiente, depende realmente se o cliente pretende ou não a manutenção das condições de conforto térmico durante toda a época de aquecimento e dos custos iniciais e de exploração.

Num grande número de casos constata-se que o critério de selecção deste tipo de equipamentos assenta no seu preço. Para decidir com algum rigor qual o sistema de aquecimento a instalar é conveniente efectuar uma análise de viabilidade técnica e uma análise de viabilidade económica.

Na análise de viabilidade técnica estuda-se a interacção entre o desempenho do sistema e o comportamento térmico do espaço. Para tal, é necessário definir as condições interiores, (temperatura, taxa de ventilação), caracterizar as condições exteriores (temperatura, radiação solar, vento, etc, estimar a componente sensível da carga térmica de aquecimento com vista à determinação da potência máxima do sistema e do consumo da energia por época de aquecimento. É importante nesta fase conhecer o modo de utilização dos espaços nomeadamente a ocupação, a iluminação e possíveis alterações do “set-point” da temperatura e da taxa de ventilação nos períodos de não ocupação.

A determinação das necessidades de aquecimento pode ser conseguida por exemplo através da utilização dum software adequado de cálculo de cargas térmicas.

2-CASO PRÁTICO

Neste trabalho apresentam-se resultados duma análise simplificada de viabilidade técnica e económica relativamente à utilização de sistemas de aquecimento eléctrico, por efeito de Joule, com e sem acumulação de calor sensível em espaços residenciais.

O espaço em estudo trata-se dum pequeno apartamento, no topo dum edificio conforme se mostra na figura 3, situado em Faro (Algarve-Portugal), com 100 m² de área útil de pavimento e um pé direito de 2.7 m.

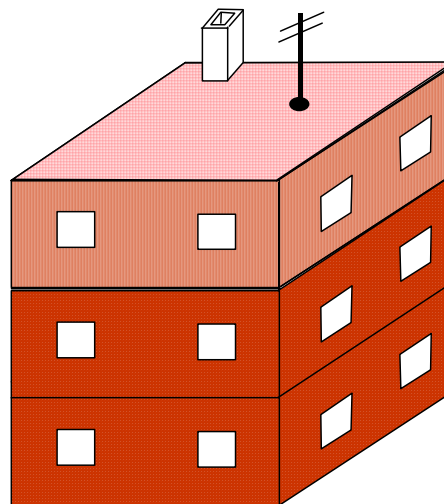


Fig. 3– Bloco de apartamentos

A qualidade térmica da envolvente do edificio está de acordo com a regulamentação portuguesa sobre térmica de edificios (RCCTE).

Para simplificar a avaliação das necessidades de aquecimento, o apartamento foi dividido ficticiamente em 4 zonas térmicas (A, B, C e D), conforme se mostra na figura 4. Cada zona tem 25 m² de área de pavimento e 1 m² de área de envidraçados.

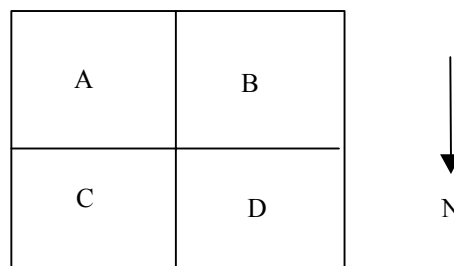


Fig. 4 – Divisão fictícia do apartamento em quatro zonas

Na tabela 1 indicam-se os valores dos coeficientes globais de transmissão de calor dos diferentes tipos de envolvente do apartamento.

Tabela 1 – Coeficientes globais de transmissão de calor

	U [W/m ² .°C]
Parede	1.3
Cobertura	0.93
Envidraçado	4

Durante toda a estação de aquecimento admite-se que a temperatura interior é mantida em 20°C e que a taxa de renovação do ar é de 1 ren/h (270m³/h)

As cargas térmicas de aquecimento foram estimadas utilizando valores horários da temperatura exterior e da temperatura sol-ar para cada dia típico dos meses da estação de aquecimento. Neste cálculo não foi considerada a contribuição dos ganhos internos.

As necessidades energéticas para um determinado dia podem ser estimadas a partir do conhecimento do histograma através da seguinte expressão:

$$Q_{\text{day}} = \int_{t=0}^{24} \dot{Q} \cdot dt \approx \sum_{i=1}^{24} Q(i) \quad (1)$$

As cargas térmicas foram obtidas com o auxílio de uma folha de cálculo desenvolvida em EXCEL.

Na tabela 2 estão representadas as necessidades totais de aquecimento nos diversos meses e a carga térmica de aquecimento máxima para cada zona.

Tabela 2 – Necessidades energéticas e carga térmica de aquecimento máxima

Necessidades energéticas [kWh]	Zona			
	A	B	C	D
Out	11	19	17	42
Nov	135	151	287	287
Dez	307	308	479	479
Jan	292	317	463	489
Fev	178	194	336	336
Mar	104	135	212	215
TOTAL	1027	1125	1794	1849
Carga Térmica Máxima [W]	835	855	912	912

As figuras 5, 6, 7 e 8 mostram os resultados do cálculo das cargas térmicas das quatro zonas do apartamento (A, B, C e D) para o dia típico de cada mês.

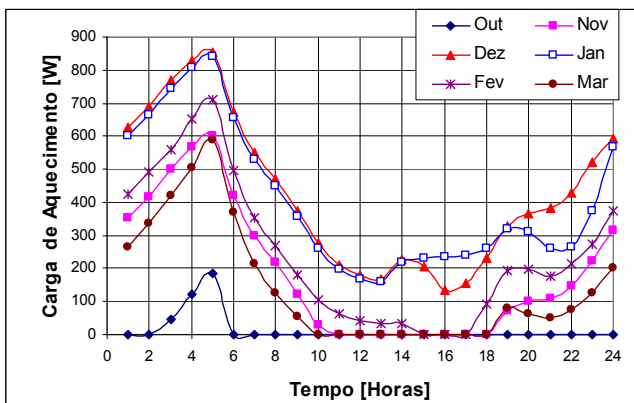


Fig. 4 – Necessidades energéticas de aquecimento da Zona A

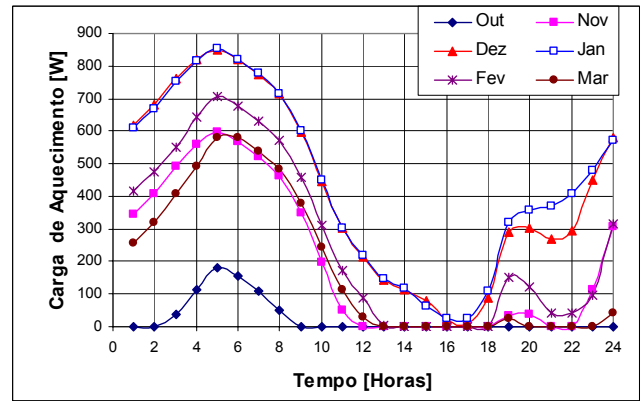


Fig. 5 – Necessidades energéticas de aquecimento da Zona B

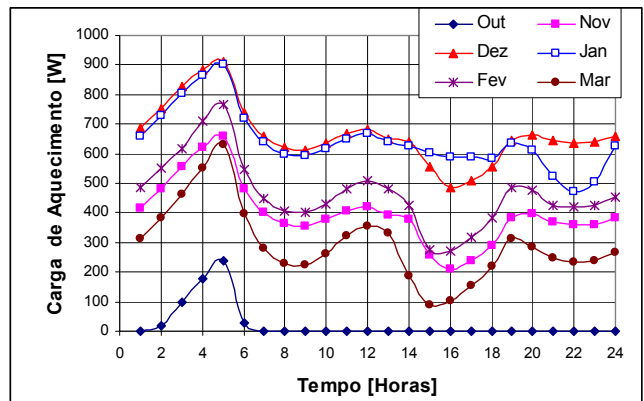


Fig. 6 – Necessidades energéticas de aquecimento da Zona C

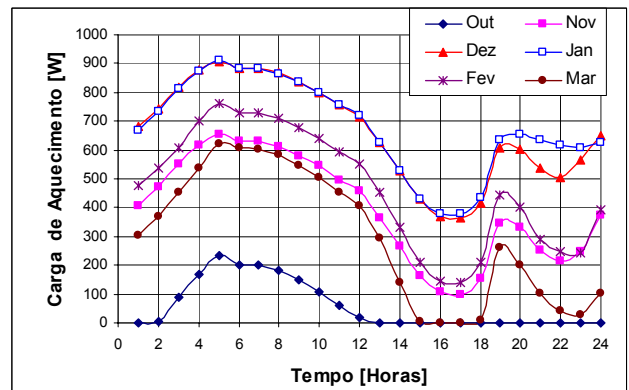


Fig. 7 – Necessidades energéticas de aquecimento da Zona D

A determinação da potência eléctrica do sistema de aquecimento sem acumulação é função apenas da carga térmica máxima, isto é, a potência eléctrica do equipamento tem que ser igual ou superior à carga máxima obtida.

$$\dot{W}_{\text{elec}} \geq \dot{Q}_{\text{max}} \quad (2)$$

Nos sistemas de aquecimento com acumulação, a potência eléctrica dos equipamentos, dependendo da

estratégia de acumulação, poderá ser superior, igual ou inferior à carga máxima obtida. Nestes sistemas, a potência eléctrica é determinada a partir das necessidades diárias de energia, $Q_{\text{dia projecto}}$, e do período considerado para a acumulação, $\Delta t_{\text{acumulação}}$, no dia de projecto:

$$\dot{W}_{\text{elec}} \geq \frac{Q_{\text{dia projecto}}}{\Delta t_{\text{acumulação}}} \quad (3)$$

As necessidades diárias de energia no dia de projecto são calculadas a partir da seguinte equação:

$$Q_{\text{dia projecto}} = \int_{t=0}^{24} \dot{Q} \cdot dt \approx \sum_{i=1}^{24} Q(i) \quad (4)$$

No caso particular do aquecimento ambiente de espaços residenciais constata-se que a potência eléctrica dos aquecedores com acumulação é mais elevada que a carga térmica de aquecimento máxima em causa. Isto deve-se ao facto do sistema funcionar apenas durante o período nocturno, quando a tarifa da energia eléctrica é mais barata, e a carga máxima ocorrer normalmente durante este período. Em Portugal existem dois sistemas tarifário, um semanal e outro diário. Neste último, a tarifa de electricidade é reduzida no período compreendido entre as 22h e as 8h.

Para esclarecer um cliente comum na compra dum sistema de aquecimento eléctrico com ou sem acumulação é importante que ele saiba realmente qual é a melhor solução, em particular sob o ponto de vista económico. Para tal, faz-se de seguida uma avaliação económica das duas soluções em causa. A primeira, solução A, diz respeito ao aquecimento eléctrico sem acumulação de calor e a segunda, solução B, engloba adicionalmente um meio sólido de acumulação de calor. Em primeiro lugar é feita a selecção do equipamento para as duas soluções a partir do conhecimento das respectivas potências eléctricas, $\dot{W}_{\text{elec A}}$ e $\dot{W}_{\text{elec B}}$, e da consulta de catálogos técnicos dos fabricantes.

Os custos de investimento das soluções A e B, respectivamente IC_A e IC_B são também estimados a partir de tabelas comerciais dos fabricantes.

Os custos de exploração de ambas as soluções englobam duas parcelas. A primeira é o custo da energia eléctrica consumida e a segunda é o custo associado ao facto da potência eléctrica instalada poder ser diferente nas duas soluções.

Para a solução A, o custo da energia no dia típico de cada mês é estimado do seguinte modo:

$$EC_{\text{dia A}} = \sum_{i=1}^7 Q(i) \times PkWh_{\text{noite}} + \sum_{i=8}^{21} Q(i) \times PkWh_{\text{dia}} + \sum_{i=22}^{24} Q(i) \times PkWh_{\text{noite}} \quad (5)$$

Para a solução B, a expressão a usar é:

$$EC_{\text{dia A}} = Q_{\text{dia}} \times PkWh_{\text{noite}} \quad (6)$$

Os preços de energia eléctrica $PkWh_{\text{dia}}$ e $PkWh_{\text{noite}}$ dizem respeito respectivamente aos períodos de tarifa normal, 8h às 22h, e de tarifa reduzida, 22h às 8h, para o sistema tarifário português.

A potência eléctrica instalada num espaço residencial depende dos equipamentos eléctricos usados, tais como, máquinas de lavar roupa e louça, frigoríficos, congeladores, fornos eléctricos, iluminação, aquecedores de água, ar condicionado, etc.

Como nos espaços residenciais a estratégia de acumulação e de desacumulação na solução B conduz a uma potência eléctrica instalada significativamente superior à da solução A faz todo o sentido considerar os encargos de potência durante os 12 meses do ano.

Nas tabelas 3, 4, 5 e 6 resume-se o processo de selecção de equipamento e os valores da energia a utilizar na análise económica.

Tabela 3.a) – Potência e necessidades energéticas durante a estação de aquecimento na zona A

Zona A/ Solução A – Aquecedor sem acumulação	
<u>Critério de Selecção:</u>	
Carga de aquecimento máxima:.... 855 W	
<u>Equipamento Seleccionado:</u>	
Potência eléctrica:.....1000 W	
<u>Consumo de energia eléctrica:</u>	
Noite (22h-8h):.....733 kWh	
Dia (8h-22):..... 294 kWh	

Tabela 3.b) – Potência e necessidades energéticas durante a estação de aquecimento na zona A

Zona A/ Solução B – Aquecedor com acumulação	
<u>Critério de Selecção:</u>	
Nec. Energ. no dia de projecto..10 kWh	
Período de acumulação:.....22 h até 8 h	
Potência eléctrica necessária.....1024 W	
<u>Equipamento Seleccionado:</u>	
Potência eléctrica:.....1600 W	
<u>Consumo de energia eléctrica:</u>	
Noite (22h-8h):.....1027 kWh	
Dia (8h-22):..... 0 kWh	

Tabela 4.a) – Potência e necessidades energéticas durante a estação de aquecimento na zona B

Zona B/ Solução A
– Aquecedor sem acumulação
<u>Critério de Selecção:</u>
Carga de aquecimento máxima:.... 855 W
<u>Equipamento Seleccionado:</u>
Potência eléctrica:.....1000 W
<u>Consumo de energia eléctrica:</u>
Noite (22h-8h):.....771 kWh
Dia (8h-22):..... 354 kWh

Tabela 4.b) – Potência e necessidades energéticas durante a estação de aquecimento na zona B

Zona B/ Solução B
– Aquecedor com acumulação
<u>Critério de Selecção:</u>
Nec. Energ. no dia de projecto..10 kWh
Período de acumulação:..22 h até 8 h
Potência eléctrica necessária....1025 W
<u>Equipamento Seleccionado:</u>
Potência eléctrica:.....1600 W
<u>Consumo de energia eléctrica:</u>
Noite (22h-8h):.....1125 kWh
Dia (8h-22):..... 0 kWh

Tabela 5.a) – Potência e necessidades energéticas durante a estação de aquecimento na zona C

Zona C/ Solução A
– Aquecedor com acumulação
<u>Critério de Selecção:</u>
Carga de aquecimento máxima:... 912 W
<u>Equipamento Seleccionado:</u>
Potência eléctrica:.....1000 W
<u>Consumo de energia eléctrica:</u>
Noite (22h-8h):.....863 kWh
Dia (8h-22):..... 931 kWh

Tabela 5.b) – Potência e necessidades energéticas durante a estação de aquecimento na zona C

Zona C/ Solução B
– Aquecedor com acumulação
<u>Critério de Selecção:</u>
Nec. Energ. no dia de projecto.. 16 kWh
Período de acumulação:.....22 h até 8 h
Potência eléctrica necessária...1596 W
<u>Equipamento Seleccionado:</u>
Potência eléctrica:.....1600 W
<u>Consumo de energia eléctrica:</u>
Noite (22h-8h):.....1794 kWh
Dia (8h-22):..... 0 kWh

Tabela 6.a) – Potência e necessidades energéticas durante a estação de aquecimento na zona D

Zona D/ Solução A
– Aquecedor com acumulação
<u>Critério de Selecção:</u>
Carga de aquecimento máxima:... 912 W
<u>Equipamento Seleccionado:</u>
Potência eléctrica:.....1000 W
<u>Consumo de energia eléctrica:</u>
Noite (22h-8h):.....898 kWh
Dia (8h-22):..... 952 kWh

Tabela 6.b) – Potência e necessidades energéticas durante a estação de aquecimento na zona D

Zona D/ Solução B
– Aquecedor com acumulação
<u>Critério de Selecção:</u>
Nec. Energ. no dia de projecto..16 kWh
Período de acumulação:.....22 h até 8 h
Potência eléctrica necessária...1597 W
<u>Equipamento Seleccionado:</u>
Potência eléctrica:.....1600 W
<u>Consumo de energia eléctrica:</u>
Noite (22h-8h):.....1849 kWh
Dia (8h-22):..... 0 kWh

Os equipamentos seleccionados tratam-se de sistemas cujo controlo de temperatura ambiente não é muito preciso, como são exemplo os aquecedores eléctricos a óleo e os aquecedores com acumulação estáticos. Tanto num caso como no outro é de esperar que hajam flutuações mais ou menos significativas na temperatura do ambiente em torno de 20 °C.

Os preços da energia eléctrica considerados foram os preços da tarifa bi-horária para o sector doméstico.

Na tabela 7 apresentam-se os custos iniciais e os custos de exploração para as duas soluções. Constatou-se que os custos de exploração da solução A são superiores, mas os custos iniciais são significativamente inferiores, cerca de 5 vezes. Na tabela 8 representa-se a evolução do Cash-Flow durante os primeiros 10 anos. Admitiu-se que o Cash-Flow é constante para todos os anos superiores ao ano 0.

Tabela 7.a) – Custos de investimento e de exploração

Solução A – Aquecedor sem acumulação	
<u>Custos de investimento:</u>	
	4 x 50 = 200.00 Euros
<u>Custos de exploração</u>	
Potência Instalada:	6.9 kVA
Custos de Potência	15.31x 12= 183.72 Euros
Custos da energia:	0.0607x 3265 + 0.1034x2531 = 459.89 Euros
Total = 643.61 Euros	

Tabela 7 – Custos de investimento e de exploração

Solução B – Aquecedor com acumulação	
<u>Custos de investimento:</u>	
	4 x 240 = 960.00 Euros
<u>Custos de exploração</u>	
Potência Instalada:	10.35 kVA
Custos de Potência	21.99x 12= 263.88 Euros
Custos da energia:	0.0607x 5795 = 351.76 Euros
Total = 615.64 Euros	

Tabela 8 – Cash flow resultante da comparação da solução A com a solução B

Ano	0	1	2	3	4	5
Cash Flow [Euros]	-760	28	28	28	28	28

O Pay-Back associado a este tipo de investimento pode ser estimado pela seguinte expressão:

$$\text{Pay Back} = \frac{IC_B - IC_A}{OC_A - OC_B} \quad (7)$$

em que OC_A e OC_B representam os custos de exploração respectivamente para a solução A e B.

Com base no cenário admitido nesta análise constata-se que o Pay-Back é de cerca de 27 anos. Se os encargos de potência forem ignorados o Pay-Back ainda assim assume valores relativamente altos, cerca de 7anos.

3- CONCLUSÕES

No presente trabalho foram calculadas as necessidades de aquecimento dum pequeno apartamento, com boa qualidade térmica da sua envolvente, situado em Faro (Algarve-Portugal) onde o Inverno não é muito rigoroso. Admitiu-se que a temperatura do ambiente interior se mantém controlada em 20°C de modo a garantir uma temperatura operativa próxima de 20°C para que as condições de conforto térmico sejam minimamente aceitáveis. Nestas condições, segundo a ISO 7730, a sensação do ser humano é de ambiente ligeiramente frio (PMV=-0.91 e PPD=22%) quando o vestuário e a actividade humana são caracterizados respectivamente por 1 clo e por 1 met. Para obter condições óptimas de conforto dever-se-ia aumentar um pouco a temperatura interior.

Foram estudadas do ponto de vista económico duas soluções de sistemas de aquecimento eléctrico, com e sem acumulação de calor sensível.

Com base nos resultados obtidos, a solução A sem sistema de acumulação de calor, situação mais usual para o cidadão comum, é realmente do ponto de vista económico a mais atractiva uma vez que o seu custo inicial é reduzido e a diferença nos custos de operação entre as duas soluções não é muito significativa.

A não viabilidade económica dos sistemas de aquecimento com acumulação prende-se com o facto de serem relativamente caros e ainda pelo facto das necessidades de aquecimento serem maiores exactamente durante a noite quando o sistema com acumulação tem de acumular energia e vencer a carga térmica simultaneamente.

Espaços sem necessidade de aquecimento nocturno, tais como escritórios e escolas são certamente casos em que os sistemas com acumulação poderão ser mais atractivos que os simples sistemas sem acumulação.

Em trabalhos futuros deve-se alargar este tipo de estudo simplificado a locais onde o Inverno é mais severo de modo avaliar o impacto das necessidades energéticas e das potências de aquecimento na selecção do equipamento e nos custos com energia eléctrica. Qualquer dos modos convém não esquecer que no Verão esta termo-electrotecnologia, com sistemas com acumulação ou sem acumulação, nada pode fazer para

superar as eventuais necessidades de arrefecimento. Neste âmbito existe um grande leque de máquinas frigoríficas com compressão mecânica, equipadas com motor eléctrico, para o sector residencial que garantem tanto o aquecimento como o arrefecimento e cuja potência eléctrica instalada e consumos de energia eléctrica são como é sabido significativamente inferiores.

4- REFERÊNCIAS

- [1]-Tarifário de Venda de Energia Eléctrica a Clientes Finais. EDP Electricidade de Portugal, 2000
- [2]-ASHRAE Handbook, Fundamentals Volume, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA, 1989
- [3]-Paiva, A. and Vasconcelos, J., Caracterização Térmica de Paredes de Alvenaria, ITE 12, LNEC Lisboa 1986
- [4]-Paiva, A. and Vasconcelos, J., Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios, ITE 28, LNEC Lisboa 1990
- [5]-José, R., Coberturas em Terraço, Gomes, Ruy, LNEC, Lisboa 1968
- [6]-Piedade, A. C., Térmica de Edifícios, LNEC, Lisboa 1982
- [7]-Lang, H. and Merino, D., The Selection Process for Capital Projects, John Wiley and Sons, 1993
- Ruivo, Celestino. Comportamento Térmico de uma Unidade Permutadora-Acumuladora de Calor Sensível. Tese de Mestrado. Coimbra. FCTUC. 1993.
- [8]-Ruivo, Celestino, Mortal, António. Economic Analysis of Electric Resistance Heating Systems with and without Sensible Heat Storage Medium. Conference UIE 2000 Lisboa-Portugal. Proceedings of the International Conference Novembro 2000.